

06;07;12

## Исследование влияния вторичных линзовых концентраторов на выходные параметры солнечных модулей с фотоэлектрическими преобразователями каскадного типа

© Н.Ю. Давидюк, Е.А. Ионова, Д.А. Малевский, В.Д. Румянцев, Н.А. Садчиков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: vmandreev@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 15 сентября 2009 г.)

В конструкции солнечных модулей с трехкаскадными InGaP/GaAs/Ge фотоэлектрическими преобразователями (ФЭП) и линзами Френеля, концентрирующими излучение, рассмотрена возможность увеличения кратности концентрирования и расширения разориентационной характеристики модуля за счет использования вторичных линзовых оптических элементов. В качестве первичных концентраторов использовались линзы Френеля с композитной структурой „стекло/силикон“ двух типоразмеров в плане:  $40 \times 40$  и  $60 \times 60$  mm (фокусное расстояние соответственно 70 и 110 mm). Фокусное расстояние вторичных плосковыпуклых стеклянных линз варьировалось в диапазоне от 5 до 25 mm. Измерения фотоэлектрических параметров ФЭП в системе с концентраторами излучения, проведенные с использованием импульсного солнечного тестера, показали увеличение кратности концентрирования и расширение разориентационной характеристики в 2.5–3 раза при использовании наиболее короткофокусных вторичных линз. Изготовлены тестовые модули с линзовыми панелями, измерение фотоэлектрических параметров которых при солнечном освещении подтвердило результаты лабораторных исследований.

### Введение

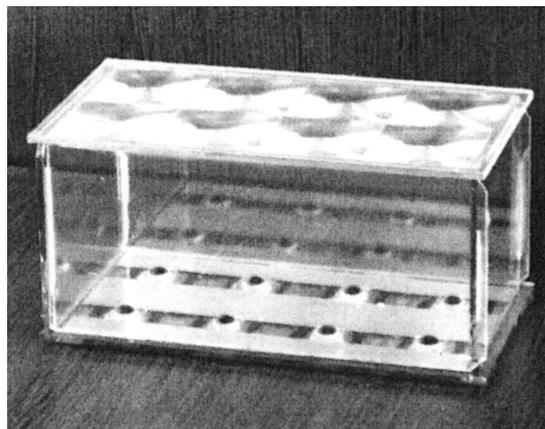
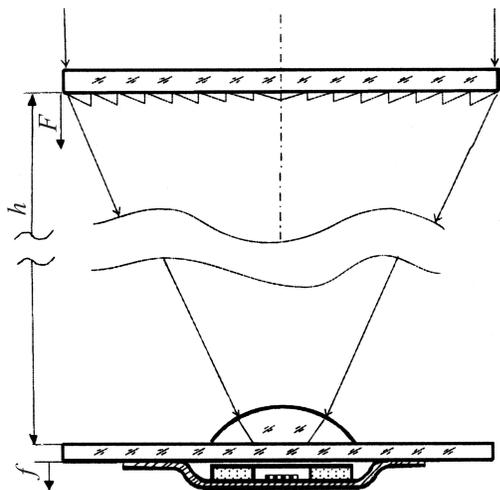
„Новая энергетика“, базирующаяся на широком использовании энергии солнечного излучения, призвана уже в ближайшем будущем инициировать процесс уменьшения зависимости мирового сообщества от ископаемого органического и ядерного топлива. Наиболее привлекательным является метод прямого преобразования солнечной энергии в электрическую с помощью высокоэффективных наногетероструктурных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) на основе материалов  $A^3B^5$  [1,2]. Так, в трехкаскадных ФЭП с монокристаллической структурой (Al)GaInP/Ga(In)As/Ge, где три фотоактивных  $p-n$ -перехода соединены последовательно в одном чипе, достигнуты значения КПД 39–41% с перспективой увеличения до 50% в структурах с еще большим количеством каскадов [3–5]. Экономическая эффективность применения таких ФЭП обеспечивается благодаря использованию оптических концентраторов солнечного излучения, изготовленных по дешевой технологии.

Перспективной является конструкция композитных линз Френеля, в которых фронтальная область представляет собой лист обычного силикатного стекла, на внутренней поверхности которого как на подложке расположена концентрическая система преломляющих свет микропризм, выполненных из прозрачного силиконового компаунда [6,7]. Поскольку кратность концентрирования излучения напрямую связана с экономией площади полупроводниковых чипов, то повышение этой кратности, усредненной по площади чипа, ведет к снижению доли затрат на ФЭП в стоимости единицы установленной мощности солнечной энергоустановки. Напомним, что

работа ФЭП при высокой плотности генерируемого фототока предпочтительна и с точки зрения максимально возможных значений КПД [8].

Особенностью преобразования концентрированного солнечного излучения является необходимость механического слежения системы „концентратор-ФЭП“ за положением солнечного диска на небосводе. Чем выше кратность концентрирования, тем точнее должно осуществляться слежение. С другой стороны, можно обеспечить малую величину солнечного пятна на поверхности ФЭП за счет высокой локальной кратности концентрирования и допускать возможность смещения этого пятна в пределах светочувствительной площадки без уменьшения выходной мощности. Это позволяет расширить диапазон углов допустимой разориентации солнечного модуля и снизить требуемую точность слежения. Таким образом, работа ФЭП при более высокой плотности светового потока желательна как с точки зрения физики процесса, так и с точки зрения экономики и конструкции систем фотоэлектрического преобразования.

Следует отметить, что существуют ограничения на максимальную кратность концентрирования солнечного излучения в системе „концентратор-ФЭП“. Они зависят как от фокусирующей способности линз Френеля, так и от возможностей структуры и конструкции ФЭП в обеспечении минимального внутреннего электрического сопротивления и противостояния тепловым нагрузкам. Введение в оптическую схему вторичного оптического элемента может улучшить параметры фотоэлектрической системы. В большинстве случаев такими элементами являются конические отражатели, изготовленные либо из полированного листового алюминия, либо из массива стекла с полированными боковыми поверхно-



**Рис. 1.** Слева — оптическая схема единичного концентраторного солнечного модуля. Показаны плоскости отсчета значений фокусного расстояния для первичной линзы Френеля ( $F$ ) и вторичной линзы ( $f$ ). Также показано значение конструктивного расстояния между фронтальным и тыльным основаниями модуля ( $h$ ); справа — фотография одного из тестовых модулей с наногетероструктурными ФЭП и вторичными линзами, предназначенного для натурных испытаний (восьмилиновый модуль на базе ЛФ 60, боковые стенки модуля стеклянные).

стями [9–11]. В последнем случае используется эффект полного внутреннего отражения света на границе стекло–воздух. Недостатком обеих конструкций является ограниченность в увеличении кратности концентрирования света и необходимость монтирования конических элементов в непосредственной близости от поверхности ФЭП — с минимальным зазором в случае пустотелых алюминиевых отражателей и на оптическом контакте (благодаря клеевому составу) в случае стеклянных отражателей.

Существует возможность использования плосковыпуклых линз малых размеров в качестве вторичных оптических элементов. Такие линзы „подфокусируют“ излучение, идущее от первичной линзы Френеля, находясь на некотором расстоянии от поверхности ФЭП [6,11]. Настоящая работа посвящена подробному исследованию влияния вторичных линзовых концентраторов на выходные параметры солнечных модулей, в составе которых используются первичные линзы Френеля и высокоэффективные трехкаскадные ФЭП.

### Оптическая схема и образцы концентраторных солнечных модулей

На рис. 1 приведена оптическая схема единичного модуля с первичным концентратором в виде композитной линзы Френеля и вторичным в виде плосковыпуклой линзы малых размеров. Сам ФЭП размещен на медном теплоотводе на внешней стороне тыльного стеклянного основания модуля. Защита от окружающей среды осуществляется при герметизации тонкого воздушного зазора между профилированной теплопроводящей пластиной и стеклянным основанием. Стеклянная плосковыпуклая линза малых размеров размещается перед ФЭП путем

наклеивания на внутреннюю сторону тыльного основания модуля. Линзы Френеля с композитной структурой „стекло/силикон“ — квадратные в плане размером либо  $40 \times 40$  mm (далее ЛФ 40), либо  $60 \times 60$  mm (ЛФ 60). Фокусное расстояние первичных линз ( $F$ ), отсчитываемое от внутренней поверхности стеклянной подложки линзы, составляло соответственно 70 и 110 mm. Диаметр фоточувствительной поверхности ФЭП был также двух типоразмеров — 1.7 mm в случае меньших размеров первичной линзы и 2.3 mm — в случае больших.

При лабораторных исследованиях на „солнечном“ тестере фокусное расстояние вторичных плосковыпуклых стеклянных линз ( $f$ ) варьировалось в диапазоне от 5 до 25 mm путем замены образцов, а расстояние между фронтальным и тыльным основаниями модуля ( $h$ ) — с помощью подвижки на механическом держателе. По результатам этих исследований были изготовлены тестовые единичные многолинзовые (по количеству первичных линз Френеля) модули (справа на рис. 1), предназначавшиеся для натурных испытаний при солнечной засветке.

### Методика измерений

Лабораторные исследования единичных концентраторных модулей проводились при использовании разработанного ранее „солнечного“ тестера, включающего в себя импульсный источник света (ксеноновую лампу), коллиматор и измерительный блок [12]. Светящаяся область лампы трубчатой формы была закрыта светонепроницаемым экраном с отверстием диаметром 6 mm. Отверстие экрана располагалось в фокусе безаберрационного зрачкового объектива. Фокусное расстояние объектива было в 100 раз больше диаметра отверстия,

так что коллимированное излучение имело остаточную расходимость, соответствующую расходимости лучей от солнечного диска (32'). Спектр излучения лампы корректировался интерференционным фильтром для соответствия спектру солнечного излучения, прошедшего через воздушную массу, АМ 1.5.

Плотность мощности импульсного излучения после коллиматора устанавливалась равной  $850 \text{ W/m}^2$ . Концентрационная фотоэлектрическая система (линза Френеля—вторичная линза—ФЭП с теплоотводом) устанавливалась на механические подвижки, обеспечивающие взаимную подстройку и варьирование расстояний между элементами, а также поперечное вращение всей системы относительно оптической оси коллиматора.

Трехкаскадный InGaP/GaAs/Ge ФЭП был напаян на профилированную теплоразводящую пластину, а эта пластина в свою очередь поджималась к тыльному стеклянному основанию модуля, оставляя фиксированный зазор  $0.5 \text{ mm}$  между ФЭП и стеклом. Сам ФЭП подсоединялся к измерительному блоку тестера. Блок питания лампы, измерительный блок и основные механические подвижки управлялись компьютером.

Ксеноновая лампа генерировала импульсы света с плоской вершиной длительностью около  $1 \text{ ms}$ . Период повторения импульсов составлял  $10\text{--}15 \text{ s}$ . Во время плоской части импульса к ФЭП прикладывалось напряжение развертки, обеспечивающее запись нагрузочной вольт-амперной характеристики (ВАХ). Система сбора данных фиксировала такие параметры ВАХ, как ток короткого замыкания ( $I_{s.c.}$ ), выходную мощность в точке оптимальной нагрузки ( $P_{\text{max}}$ ), фактор заполнения ВАХ ( $FF$ ) и КПД фотоэлектрического преобразования. В ряде экспериментов строилась разориентационная кривая модуля, т. е. зависимость  $I_{s.c.}$  от угла отклонения оптической оси модуля по отношению к оптической оси коллиматора. Допустимый диапазон углов восприятия излучения оценивался по полуширине этой кривой на уровне  $0.9$  от значения тока при нормальном падении лучей на первичную линзу ( $\pm W_{0.9}$ ). Также проводилось фотометрирование светового пятна, формируемого на поверхности ФЭП. В этом случае вместо ФЭП использовался однопереходный фотоприемник с  $p\text{--}n$ -переходом в арсениде галлия, диафрагмированный отверстием диаметром  $0.12 \text{ mm}$ . Специальная калибровка позволяла определять абсолютные значения локальной кратности концентрирования излучения и оценивать диаметр пятна по уровню  $0.1$  от максимального значения фототока в центре ( $d_{0.1}$ ).

Измерение фотоэлектрических параметров тестовых модулей в натуральных условиях производилось при их размещении на установке слежения за солнцем. Нагрузочные ВАХ записывались с помощью аналого-цифрового измерительного блока, а плотность мощности прямого (от диска Солнца) падающего излучения измерялась с помощью калиброванного пиргелиометра СН-1 фирмы „Kipp and Zoned“ и солнечного элемента, калиброванного в National Renewable Energy Laboratory (Golden, Colorado).

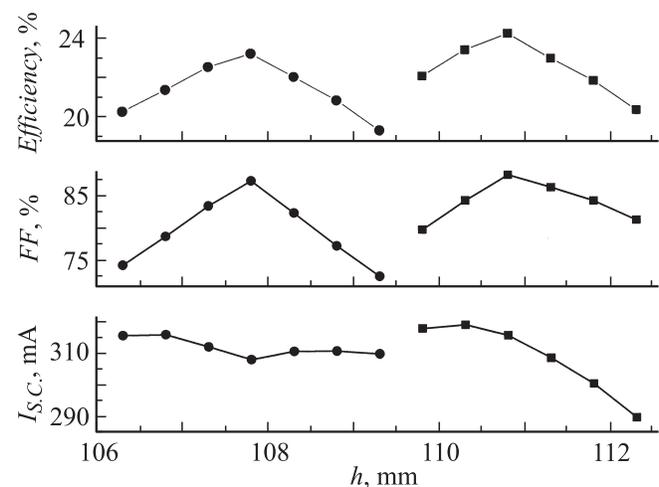
## Результаты лабораторных исследований

На первом этапе исследований для каждой пары первичной и вторичной линз из заготовленного набора (см. ниже) подбиралось оптимальное расстояние  $h$  в составе модуля. Критерием оптимизации служило максимальное значение КПД фотоэлектрического преобразования, поскольку КПД может и увеличиваться благодаря лучшей фокусировке излучения, и уменьшаться из-за слишком высокой локальной концентрации излучения и связанного с этим уменьшения значения  $FF$  в нагрузочной ВАХ.

На рис. 2 в качестве примера приведены зависимости  $I_{s.c.}$ ,  $FF$  и КПД от расстояния  $h$  для ЛФ 60 в паре с ФЭП диаметром  $2.3 \text{ mm}$ . Этот же рисунок дает представление о необходимой точности взаимного расположения первичной и вторичной линз вдоль оптической оси, составляющей примерно  $0.25 \text{ mm}$ .

В табл. 1 и 2 приведены параметры тестовых единичных модулей, измеренные в условиях лаборатории с помощью „солнечного“ тестера. Для обоих тепоразмеров модулей можно отметить следующее. Как и ожидалось, введение промежуточного тыльного стекла для расположения вторичных линз уже само по себе приводит к снижению тока и КПД за счет отражения света на двух дополнительных границах раздела „стекло—воздух“. Введение сравнительно длиннофокусных вторичных линз с односторонним просветляющим покрытием увеличивает ток как за счет частичного уменьшения отражения, так и за счет лучшего собирания света на поверхности ФЭП.

В случае более короткофокусных вторичных линз происходит значительное восстановление тока даже в отсутствие просветления — только за счет подфокусировки излучения. Положительным фактом явилось то,



**Рис. 2.** Зависимости  $I_{s.c.}$ ,  $FF$  и КПД от расстояния  $h$  для ЛФ 60 в паре с ФЭП диаметром  $2.3 \text{ mm}$ . Кривые в правой части рисунка приведены для случая отсутствия каких-либо вторичных оптических элементов, в левой части — при введении вторичной линзы с фокусным расстоянием  $f = 8 \text{ mm}$ .

**Таблица 1.** Параметры единичного модуля для ЛФ 40 с ФЭП диаметром 1.7 mm

Выходные параметры и условия эксперимента	$I_{s.c.}$ , mA	$FF$ , %	$P_{max}$ , mW	КПД, %	$d_{0.1}$ , mm	$C_{max}$ , factor	$\pm W_{0.9}^\circ$
Первичная линза Френеля и ФЭП без тыльного стекла	141	86.9	382	23.8	1.15	1732	0.35
То же с тыльным стеклом без вторичной линзы	127	87.7	348	21.8			
Вторичная линза $f = 25$ mm с просветлением на выпуклой стороне	135	87.9	376	22.9	0.98	1880	0.47
То же, $f = 20$ mm	135	87.2	366	22.8			0.49
То же, $f = 8$ mm, без просветления	133	85.8	354	22.0	0.73	4240	0.71
То же, $f = 5$ mm, без просветления	129	86.1	343	21.5	0.56	6826	1.0

**Таблица 2.** Параметры единичного модуля для ЛФ 60 с ФЭП диаметром 2.3 mm

Выходные параметры и условия эксперимента	$I_{s.c.}$ , mA	$FF$ , %	$P_{max}$ , mW	КПД, %	$d_{0.1}$ , mm	$C_{max}$ , factor	$\pm W_{0.9}^\circ$
Первичная линза Френеля и ФЭП без тыльного стекла	316	88.1	870	24.2	1.84	1640	0.257
То же с тыльным стеклом без вторичной линзы	291	86.6	784	21.7			
Вторичная линза $f = 25$ mm с просветлением на выпуклой стороне	310	86.1	832	23.2	1.56	2226	0.367
То же, $f = 20$ mm	312	85.9	834	23.0			0.374
То же, $f = 8$ mm, без просветления	308	87.2	839	23.2	1.12	4320	0.587
То же, $f = 5$ mm, без просветления	303	85.5	808	22.5	1.0	6960	0.900

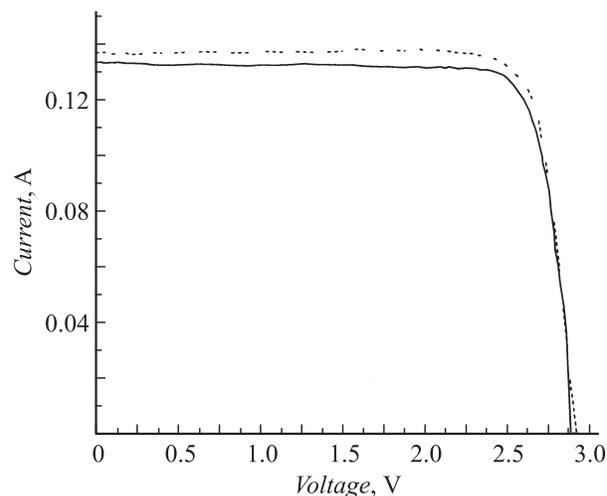
что во всех случаях фактор заполнения ВАХ оказался более 85% несмотря на значительное уменьшение диаметра светового пятна и связанное с этим существенное увеличение локальной кратности концентрирования излучения.

Световое пятно меньшего диаметра может дольше оставаться на поверхности ФЭП при разориентации оптической оси модуля относительно источника излучения. Это обусловило почти трехкратное расширение контура разориентационной характеристики модулей в случае наиболее короткофокусных вторичных линз. По совокупности параметров в табл. 1 и 2 вторичные линзы с  $f = 8$  mm можно считать оптимальными для применения в практических модулях обоих типоразмеров.

## Результаты натурных исследований

Для измерений при солнечной засветке были изготовлены единичные и многолинзовые концентраторные модули без вторичных линз, используемые в качестве контрольных, а также модули с вторичными линзами при  $f = 8$  mm. На рис. 3 приведены нагрузочные ВАХ единичного модуля с ЛФ 40 и ФЭП диаметром 1.7 mm при засветке солнечными лучами, падающими по нормали к фронтальной поверхности модуля. Пунктирная кривая ВАХ записана для модуля без вторичной линзы. Благодаря отобранному для этого модуля лучшим экземплярам первичной линзы Френеля и ФЭП, измеренный

КПД составил 27.1%. Сплошная кривая ВАХ получена при введении вторичной линзы с  $f = 8$  mm. В этом случае КПД модуля был 25.7%. Уменьшение КПД на 5%

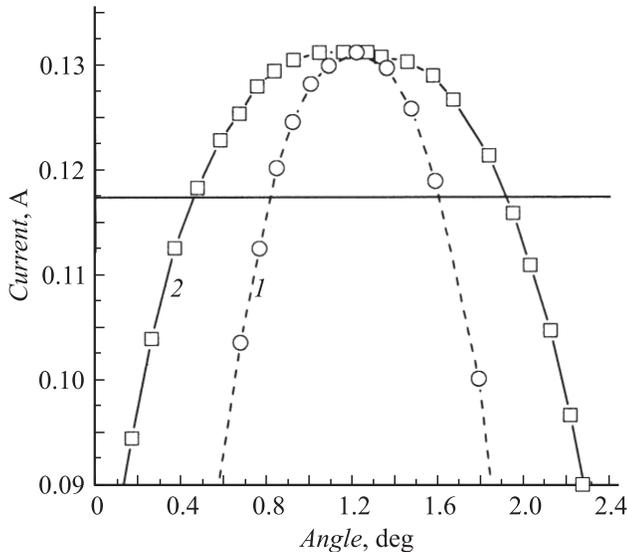


**Рис. 3.** Нагрузочные ВАХ единичного модуля с ЛФ 40 и ФЭП диаметром 1.7 mm при солнечной засветке. Пунктир — для модуля без вторичной линзы, плотностью мощности падающего солнечного излучения  $E = 786$  W/cm<sup>2</sup>, КПД модуля 27.1%. Сплошная кривая — при введении вторичной линзы с  $f = 8$  mm,  $E = 790$  W/cm<sup>2</sup>, КПД модуля 25.7%. Температура окружающего воздуха  $T = 22^\circ$ С, значения КПД приведены без коррекции на повышенную температуру ФЭП.

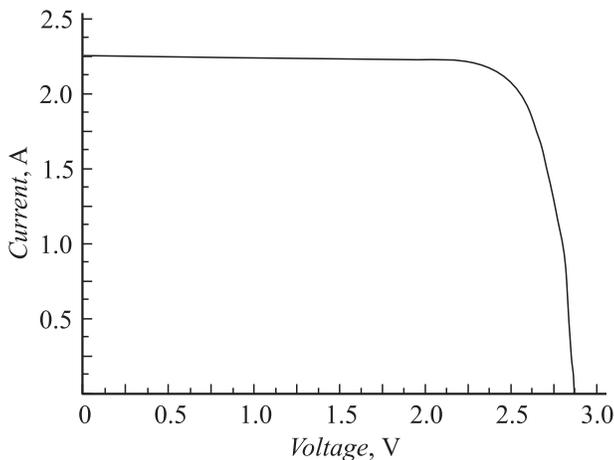
вызвано отражением света на двух дополнительных стеклянных гранях и может быть полностью скомпенсировано при использовании просветляющих покрытий.

На рис. 4 приведены разориентационные кривые (т.е. зависимости тока короткого замыкания от угла рассогласования оптической оси модуля от направления на Солнце) для этого же модуля без вторичной линзы и с линзой. Использование вторичной линзы приводит к увеличению полуширины кривой на уровне 0.9 от значения  $\pm W_{0,9} = \pm 0.39$  до  $\pm 0.72^\circ$ .

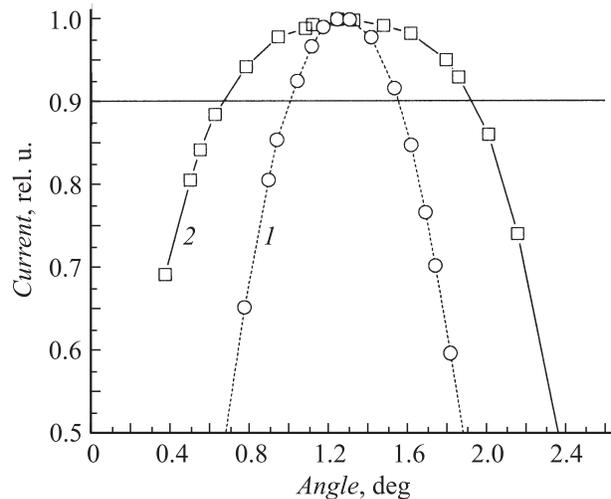
На рис. 5 приведена нагрузочная ВАХ восьмилинзового модуля с ЛФ 60, ФЭП диаметром 2.3 mm и



**Рис. 4.** Разориентационные кривые для модуля с ЛФ 40 и ФЭП диаметром 1.7 mm при солнечной засветке. 1 — для модуля без вторичной линзы,  $\pm W_{0,9} = \pm 0.39^\circ$ . 2 — при введении вторичной линзы с  $f = 8$  mm,  $\pm W_{0,9} = \pm 0.72^\circ$ .



**Рис. 5.** Нагрузочная ВАХ восьмилинзового модуля с ЛФ 60, ФЭП диаметром 2.3 mm и вторичными линзами с  $f = 8$  mm при солнечной засветке. Плотность мощности падающего солнечного излучения  $E = 901$  W/cm<sup>2</sup>, КПД модуля 21,4%. Температура окружающего воздуха  $T = 24$ С, значение КПД приведено без коррекции на повышенную температурную ФЭП.



**Рис. 6.** Разориентационные кривые при солнечной засветке для двух восьмилинзовых модулей с ЛФ 60 и ФЭП диаметром 2.3 mm: без вторичных линз (1 —  $\pm W_{0,9} = \pm 0.27^\circ$ ) и со вторичными линзами с  $f = 8$  mm (2 —  $\pm W_{0,9} = \pm 0.64^\circ$ ).

вторичными линзами с  $f = 8$  mm (см. рис. 1) при солнечной засветке, осуществляемой по нормали к фронтальной поверхности. При плотности мощности падающего солнечного излучения  $E = 901$  W/cm<sup>2</sup> КПД модуля составил 21,4%. Температура окружающего воздуха была  $T = 24^\circ$ С, а температура ФЭП оценивалась как  $42\text{--}45^\circ$ С, т.е. значительно выше, чем стандартная  $T = 25^\circ$ С, принятая для обеспечения одинаковости условий сравнения результатов измерений подобного рода. Поведение этого модуля при разориентации от направления на Солнце сравнивалось с поведением аналогичного модуля без вторичных линз. Результаты сравнения представлены на рис. 6. Как и в предыдущем случае, вторичные линзы дают существенное расширение разориентационной кривой модуля от значения  $\pm W_{0,9} = \pm 0.27$  до  $\pm W_{0,9} = \pm 0.64^\circ$ .

## Заключение

Проведенные лабораторные и натурные исследования концентраторных солнечных модулей с вторичными линзовыми элементами и наногетероструктурными ФЭП каскадного типа показали преимущества данной конструкции в нескольких аспектах.

Во-первых, благодаря уменьшению размеров фокального пятна расширяется диапазон углов восприятия модулем солнечного излучения при тех же размерах ФЭП либо появляется возможность использования ФЭП меньших размеров.

Во-вторых, обеспечивается защита ФЭП от неблагоприятных факторов окружающей среды (пыль, конденсат) путем полной герметизации тонкого воздушного промежутка, образованного дополнительной стеклянной панелью со вторичными линзами.

В третьих, монтаж вторичных линзовых элементов осуществляется весьма просто и без непосредственного контакта с фоточувствительной поверхностью ФЭП. При этом исключаются проблемы, присущие монтажу вторичных элементов отражающего типа (минимальный зазор и возможное коррозионное взаимодействие с ФЭП в случае металлических отражателей, оптический клеевой контакт и его возможное радиационное разрушение в случае стеклянных элементов, работающих на принципе полного внутреннего отражения). Небольшие потери света, возникающие при введении вторичных линз, могут быть частично компенсированы при использовании просветляющих покрытий. При этом можно получить даже абсолютный прирост КПД модуля за счет лучшего собирания света в двухлинзовой концентраторной системе.

Продолжение работ связано с созданием оборудования и приспособлений для прецизионного монтажа составляющих элементов в полноразмерных концентраторных модулях.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 09-08-00412-а.

## Список литературы

- [1] Алферов Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. // ФТП. 2004. Т. 38. Вып. 8. С. 937–948.
- [2] Alferov Zh.I., Andreev V.M., Rumyantsev V.D. // High-Efficient Low-Cost Photovoltaics. Springer Series in Opt. Sci. 2008. Vol. 140. P. 101–141.
- [3] Karam N.H., Sherif R.A., King R.R. // Ibid. P. 199–219.
- [4] Bett A.W., Dimroth F., Siefer G. // Ibid. P. 67–87.
- [5] Андреев В.М., Румянцев В.Д., Лантратов В.М., Шварц М.З., Калужный Н.А., Минтауров С.А. // Тр. Междунар. форума по нанотехнологии. М., 2008. Т. 1. С. 360–362.
- [6] Rumyantsev V.D., Chosta O.I., Grilikhes V.A., Sadchikov N.A., Soluyanov A.A., Shvarts M.Z., Andreev V.M. // 29<sup>th</sup> IEEE PVSC. New Orleans, 2002. P. 1596–1599.
- [7] Rumyantsev V.D. // Concentrator Photovoltaics. Springer Series in Opt. Sci. 2007. Vol. 130. P. 151–174.
- [8] Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. М.: „Наука“, 1989. 310 с.
- [9] Araki K., Kondo M., Uozumi H., and Yamaguchi M. // 3rd World Conf. on Photovoltaic and Energy Conversion. Osaka, 2003. P. 853–856.
- [10] Jaus J., Nitz P., Peharz G., Siefer G., Schult T., Wolf O., Passig M., Gandy T., Bett A.W. // 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conf. San Diego, 2008. (Proceedings on CD).
- [11] Rumyantsev V.D., Davidyuk N.Yu., Ionova E.A., Lariionov V.R., Malevskiy D.A., Pokrovskiy P.V., Sadchikov N.A., Andreev V.M. // 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Solar Concentrators for the Generation of Electricity. Palm Desert, 2008. (Proceedings on CD).
- [12] Андреев В.М., Ларионов В.Р., Ловыгин И.В., Малевский Д.А., Масленков М.Я., Румянцев В.Д., Шварц М.З. // Тр. Междунар. форума по нанотехнологиям. М., 2008. Т. 1. С. 205–207.